

ПРИМЕНЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО МЕТОДА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОДЗЕМНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВОДНОГО БАЛАНСА

Р.М.Кашкай, М.А.Теймуров

*Институт географии им. Г.А.Алиева НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 115
e-mail: doktor_rq@mail.ru*

В статье впервые дается оценка подземных вод, участвующих в формировании речного стока рациональным методом с использованием ГПС среды на примере рек Курмукчай и Турианчай. Сравнение подземной составляющей речного стока, полученной по предложенной авторами формуле $Q_u = L \times \frac{F}{R}$ и по методу водного баланса, показывает, что разница между ними очень мала или вовсе отсутствует, что позволяет применить рациональный метод для определения величины подземного стока в реки в любых географических условиях, охваченных и не охваченных наблюдениями.

Подземный сток в реки с точки зрения определения его доли в питании рек и участия в водно-балансовых исследованиях остается все еще малоизученной областью гидрологии. В различные годы этот вопрос затрагивался в работах М.И.Львовича (1938), М.Бернард (1938), Ф.А.Макаренко (1948), О.В.Попова (1968), R.E.Horton (1933), R.H.Hawkins (1978), R.E.Smith (1976), V.M.Ponce (1989, 2015), D.B.Thompson (2006), М.А.Yaeger и др. (2009). В Азербайджане сравнительно глубокое изучение проводилось В.Д.Быковым (1964), Р.М.Кашкай (1973) на Большом Кавказе, затем по всей республике в целом (Рустамов, Кашкай, 1978). Таким образом, за последние 25-30 лет исследования по вопросам определения доли подземного стока в реки в республике не проводились.

За весь период водно-балансовых исследований при определении доли подземного стока в реки в основном было предложено 3 метода:

1) метод Ф.А.Макаренко, основанный на прямом определении суммарных расходов подземных вод, питающих реку и гидравлически не связанных с ней;

2) метод вертикального расчленения гидрографа;

3) метод определения подземного стока в реки как разницы между годовым стоком и другими его составляющими.

Основная трудность в определении подземного стока в реки проявляется в период прохождения весенне-летних паводков и половодий. Поэтому наиболее приемлемым мог бы явиться первый метод. Однако, не располагая данными наблюдений за режимом всех подзем-

ных источников в бассейнах рек в горных странах, применить этот метод не было возможности.

Поэтому при исследованиях доли подземного стока в водном балансе республики применялся второй метод, который в то время был, а во многих случаях и сейчас является более приемлемым методом, хотя и страдает некоторым субъективизмом.

Однако в последнее время в мировой научной литературе просматривается тенденция увеличения исследований по определению отдельных элементов водного баланса. На фоне глобальных изменений в природе особый интерес и актуальность представляют исследования по оценке речных водных ресурсов, являющихся главным источником питьевого водоснабжения. Большая часть этих исследований по оценке водных и земельных ресурсов, их экологии проводилась по заказу таких международных организаций, как ЮНЕСКО и ФАО.

Основной целью этих исследований явились:

1. Разработка методики, оперативно отражающей изменения в величинах водных ресурсов при глобальных климатических и других изменениях в природе.

2. Более точное определение элементов водного баланса.

3. Проведение работ как прогнозного характера, так и по определению устойчивости к природным рискам.

4. Возможность использования новых методик для оценки водных ресурсов в аридных и семиаридных областях, испытывающих острую их недостаточность.

В условиях Азербайджана при неравномерном распределении стока как по территории, так и внутри года большую роль играет естественная зарегулированность рек. И она проявляется в величинах подземного стока, являющегося основным источником питания рек в бездождливый, засушливый период. При определении подземной составляющей речного стока на гидрографе стока принималось, что после интенсивных дождей подземный сток в реки возрастает, плавно повторяя очертания полного речного стока с некоторым запозданием наступления его максимума (от 5 до 10 дней). В зависимости от геологического строения бассейна и литологического состава отложений в некоторых случаях время наступления этих максимумов совпадает. Это подтверждается при сравнении дебита родника (по данным Азгеологуправления и Ф.Ш.Алиева, 2000) и значений атмосферных осадков (рис.1).

Исследования, проведенные Университетом Альберта Людвиг во Фрайбурге (Tilch et al., 2003), также говорят о генетической связи между осадками, речным стоком и дебитом родника, расположенного в горной части бассейна реки Бругга, трансграничной с Германией и Австрией (рис.2).

Регулирующая роль подземного стока проявляется после интенсивных дождей. Именно в этот период начинается подпитывание почвы, а затем и подземных вод. В дальнейшем в бездождливый период наблюдается резкое увеличение стока (табл.1). Как видно из таблицы, по данным метеостанции Загатала выпавшие 21 мая осадки (29,4 мм), хотя и способствовали увеличению стока за счет поверхностных вод, однако в последующие (бездождливые) дни произошло резкое увеличение стока (от 7,21 до 8,07 м), что объясняется увеличением его подземной составляющей. То же самое можно сказать об осадках, выпавших 26.VI, 21.VII, 4.VIII, 25.VIII.

Несмотря на то, что в исследованиях последних десятилетий большое внимание уделяется уточнению средних величин речного стока, однако особый интерес вызывает подземная его составляющая. В настоящее время наиболее точным методом в определении водных ресурсов и элементов водного баланса, в том числе подземного стока, в западных источниках считается рациональный метод. Этот метод, предложенный Е.Кучингом (Kuiching, 1889), перво-

начально применялся для определения величины атмосферных осадков, переходящих в сток в малых речных бассейнах и городах. В дальнейшем, усовершенствуясь, этот метод стал применяться в более широком спектре, а именно, для определения речного стока и элементов водного баланса не только изученных речных бассейнов, но и любых территорий, не охваченных наблюдениями.

Основные пользователи этого метода: «Служба охраны природных ресурсов» в США (NRCS), Министерство сельского хозяйства (USDA), Служба охраны земельных ресурсов (SCS). Полученные на протяжении многих лет данные измерительных работ и итогов научных исследований позволили им получить рациональные коэффициенты стока, которые в виде отдельных таблиц собраны в сборниках «Управление паводками», «Технический Reliz – 55», «Определение половодий и речного стока» и др.



Рис. 1. Совмещённый график изменения дебита родника Тананам и атмосферных осадков в течение года

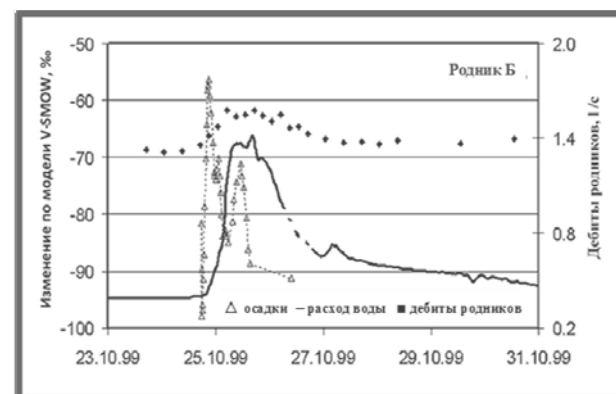


Рис. 2. Совмещённый график изменения дебита родника (*), осадков (Δ) и стока в течение года

Таблица 1

Регулирующая роль подземного стока

месяцы	май		июнь		июль		август	
дни	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
1	2,2	7,50		6,52		5,61		4,70
2	13,6	8,44		5,56		5,07	0,4	4,25
3		7,94		4,61		4,84		3,81
4	0,4	7,45	1,6	5,53	7,8	4,61	100,4	4,17
5	0,4	6,95	23,3	5,56		4,38	1,3	4,53
6	9,0	6,55		5,58	4,9	4,26		4,90
7		6,14		5,60	1,4	4,15		5,26
8	3,6	5,74		5,63		4,57	0,3	5,62
9	5,4	6,24	31,5	9,49	11,7	4,99		5,04
10		6,04	37,9	9,43	0,3	5,41		4,45
11		5,84	1,2	9,37		5,14		4,17
12	0,3	5,64		9,32		4,86		3,90
13	2,0	6,90	16,4	9,26		4,59		3,62
14	35,9	8,15	0,4	9,20		4,27		3,41
15	3,4	7,95	3,6	7,72		3,94		3,20
16		7,76		6,23		3,62	0,5	3,17
17	3,0	7,56		4,75		3,52		3,13
18		7,39	7,3	7,89		3,43		3,10
19	0,4	7,23		6,81		3,33		3,16
20		7,06	4,0	5,74	14,7	4,34		3,23
21	29,4	7,21	6,2	4,66	57,8	5,35	0,3	3,65
22	0,4	7,35	0,3	4,52	1,0	4,80	41,2	4,07
23		7,50		4,39	1,8	4,24	8,4	4,49
24	1,1	7,64	38,5	4,64	1,8	3,68	45,5	4,91
25	0,9	7,79	28,3	4,89		3,13	51,2	5,33
26		7,98	60,3	5,14	5,9	5,21		5,75
27		8,18	0,3	5,40	2,6	5,54	4,7	6,17
28	4,9	8,37	2,5	5,65	5,8	5,86	7,4	6,59
29	5,2	8,07		5,90	6,9	6,19	1,8	7,01
30	4,6	7,77		6,15		5,66		7,43
31		7,47				5,14		7,35

В соответствии с изменениями уклонов, растительного покрова, гранулометрического состава наносов и уровня инфильтрации, использованием земель определяются коэффициенты поверхностного стока (рациональные коэффициенты). Определение других элементов водного баланса производится на основании этих коэффициентов и количества атмосферных осадков. Основными ком-

понентами водного баланса, определяемыми при непосредственном использовании этого метода, являются потери поверхностного стока (L – гидрологический абстракт), максимальное водосодержание почвы (R), первичный абстракт (I_a) и фактическая увлажненность почвы (F).

1. Потери поверхностного стока, или гидрологический абстракт (L) – это увлажненность

территории, не участвующая в образовании поверхностного стока – $L = P - Q_s$, где P – осадки, Q_s – поверхностный сток. Гидрологический абстракт характеризуется пятью составляющими и выглядит в таком виде:

$L = \dot{I} + E + T + D + N$, где $\dot{I}$ – инфильтрация, T – транспирация, N – смачивание растительности, D – аккумуляция осадков в пониженных участках водосбора. Так как два последних компонента играют в водно-балансовых исследованиях второстепенную роль и косвенно проявляются в других элементах, то формула гидрологической абстракции принимает следующий вид:

$$L = \dot{I} + E_o, \text{ т.е. } E_o = E + T.$$

Эта формула по своему значению соответствует используемой формуле валового увлажнения территории ($W = P - S = U + E$), примененной М.И.Львовичем (1979) в мировом масштабе, а в дальнейшем Р.М.Кашкай (1973) – для восточной части Большого Кавказа и позднее С.Г.Рустамовым и Р.М.Кашкай (1978) и Р.М.Кашкай (2008) – для Азербайджана в целом. Приведенное здесь валовое увлажнение территории (W) в какой-то мере соответствует понятию гидрологической абстракции, являющейся одним из компонентов рационального метода. Однако если в формуле валового увлажнения территории E – это испарение с поверхности водосбора, то в формуле рациональных коэффициентов E_o – это общая испаряемость.

2. То же можно сказать и о максимальном водосодержании почвы (R). Между этим элементом и поверхностным стоком проявляется нижеследующая связь:

$$R = 5 \times \left[P + 2Q_s - (4Q_s^2 + 5PQ_s)^{1/2} \right].$$

Здесь разница также заключается в том, что если в формуле валового увлажнения территории используются фактические данные потерь стока, то под максимальным водосодержанием почвы подразумеваются потери влаги в конкретных физико-географических условиях.

3. Первичная абстракция (I_a) – это переходной этап в превращении осадков в поверхностный сток, который характеризуется первоначальным расходом осадков на увлажнение почвы, первичным испарением, аккумуляцией воды во впадинах, увлажнением растений и др. Образование поверхностного стока происходит

при полной увлажненности подстилающей поверхности и определяется по формуле $I_a = 0,2R$.

4. Фактическая увлажненность почвы, т.е. инфильтрация (F), отражает состояние увлажненности почвы после выпадения дождей в определенных условиях и определяется как $F = P - Q_s - I_a$.

Известно, что речной сток является функцией двух его составляющих: поверхностного Q_s и подземного стока (Q_u). Поверхностный сток определяется рациональным коэффициентом и количеством осадков. Для определения подземного стока в реки нами предложена нижеследующая формула:

$$Q_u = L \times \frac{F}{R},$$

где F – фактическая влажность почвы после выпадения дождя, R – максимально возможная увлажненность почвы.

Таким образом, определение водного баланса той или иной территории рациональным методом происходит в следующей последовательности:

1. Коэффициент стока определяется рациональным методом и по CIS программе, а его расход по формуле $Q_s = k \times ciA$. Здесь k – переходный конвертируемый коэффициент, определенный нами как $k = 0,0000314$, c – рациональный коэффициент, i – количество атмосферных осадков, A – площадь водосбора.

2. На основании данных о поверхностном стоке и осадках определяется максимум водосодержания почвы (R) и первичная абстракция I_a по формуле $I_a = 0,2R$.

3. По формулам $L = P - Q_s$ и $F = P - Q_s - I_a$ определяются гидрологический абстракт (L) и фактическая увлажненность почвы (F).

4. По формуле $Q_u = L \times \frac{F}{R}$ устанавливается доля подземного стока в полном речном стоке.

5. При отсутствии наблюдений полный речной сток определяется как сумма поверхностного и подземного стока.

6. Разница между осадками и полным речным стоком соответствует испарению.

С целью определения доли подземного стока в питании реки нами взяты два речных бассейна – Курмухчай и Турианчай, отличающиеся по условиям питания. Это отражено в таблицах 2-5.

Таблица 2

Определение поверхностного стока рациональным методом по формуле $Q_s = k \times ciA$

Река	Площадь водосбора, км	Осадки, мм	Рациональный коэффициент	Поверхностный сток, м ³ /с
Курмухчай	571,6	864,9	0,384	5,95
Турианчай	1840	822,4	0,149	7,08

Таблица 3

Элементы водного баланса, определенные рациональным методом (мм)

Река	Гидрологический абстракт, L	Фактическое водосодержание почвы, F	Максимальное водосодержание почвы, R	Осадки, P	F/R	Подземный сток, Q_u
Курмухчай	532,8	373,9	794,7	158,9	0,470	250,4
Турианчай	699,9	383,3	1583	316,6	0,242	169,4

Таблица 4

Основные элементы водного баланса в мм

Река	Осадки, P	Речной сток, Q_t	Поверхностный сток, Q_s	Подземный сток в реки, Q_u	Испарение E
Курмухчай	864,9	582,5	332,1	250,4	282,4
%	100,0	67,3	38,4	28,9	32,7
Турианчай	822,4	291,9	122,5	169,4	530,5
%	100,0	35,5	14,9	20,6	64,5

Таблица 5

Сравнение величин подземного стока методом водного баланса и рациональным методом

Метод	Рациональный коэффициент	Полный речной сток, м³/с	Источники питания, %	
			поверхностный	подземный
Курмухчай				
Водно-балансовый	0,370	10,70	57,0	43,0
Рациональный и ГИС среда	0,384	10,43	57,1	42,9
Разница, %	+3,64	-2,52	+0,1	-0,1
Турианчай				
Водно-балансовый	0,160	17,90	39,0	61,0
Рациональный и ГИС среда	0,149	16,89	41,9	58,1
Разница, %	-6.87	-5.03	+2.90	-2.90

Рациональный метод позволяет не только определять поверхностный сток и увлажненность почвы, но на основании предложенной нами формулы, включающей и другие элементы водного баланса, определять подземную составляющую речного стока.

Как видно из таблицы 5, величины подземного стока в реки (вышеуказанные), полученные методом водного баланса и рациональным методом, мало отличаются друг от друга и составляют $\pm 3\%$. Так, если подземный сток при водно-балан-

совых исследованиях составлял на реке Курмухчай – 43% (4,48 м³/с), а на реке Турианчай – 61%, то рациональным методом эти величины составляют соответственно 42,9% и 58,1%.

Это ещё раз подтверждает, что рациональный метод вне зависимости от пространства и времени, охваченности или неохваченности наблюдениями дает возможность без больших усилий и трудоемких работ определить подземный сток в реки только лишь за счет атмосферных осадков.

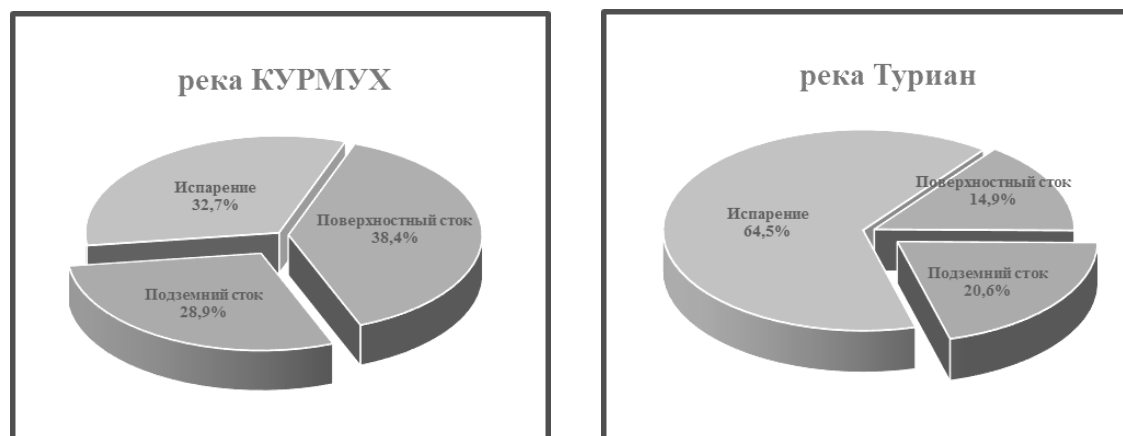


Рис. 3. Составляющие водного баланса, рассчитанные рациональным методом

Заключение

1. Анализ научных источников и гидрометеорологических данных дал возможность определить режим питания рек подземного стока. Выявлено, что после сильных дождей этот процесс активизируется с опозданием в 3-5 дней, постепенно ослабевая в дальнейший бездождливый период.

2. На основе рационального метода и возможностей ГИС технологии впервые для Азербайджана определен подземный сток в реки и предложена формула эмпирической связи.

3. При сравнении результатов оценки подземного стока методами водного баланса и рациональным в ГИС среде выявлено, что во многих случаях они отличаются незначительно, а зачастую и вовсе совпадают. Это дает основание использовать этот метод определения подземного стока в реки в любых физико-географических условиях при недостаточности материалов наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

- БЫКОВ, В.Д. 1964. Изучение русловой фильтрации на реках Куба-Хачмазского массива. Количественные методы в географии. Издательство МГУ. 55-69.
- КАШКАЙ, Р.М. 2008. Географические аспекты формирования и прохождения стока рек и использования водных ресурсов Азербайджана. Диссертация на соиск. уч. степ. доктора географических наук. Баку. 231-233.
- КАШКАЙ, Р.М. 1973. Водный баланс Большого Кавказа в пределах Азербайджанской ССР. Элм. Баку. 83 с.
- МАКАРЕНКО, Ф.А. 1948. О подземном питании рек. *Труды лаборатории гидрологических проблем*, том 1. Москва-Ленинград.

- ПОПОВ, О.В. 1968. Подземное питание рек. Гидрометеорологическое издательство. Ленинград. 291 с.
- РУСТАМОВ, С.Г., КАШКАЙ, Р.М. 1978. Водный баланс Азербайджанской ССР. Элм. Баку.
- ƏLİYEV, F.Ş. 2000. Azərbaycan Respublikasının yeraltı suları, ehtiyatlardan istifadə və geokoloji problemləri. Bakı. 323s
- BERNARD, M. 1938. Modified rational method of estimating flood flows. Natural Resources Commission. Washington D.C.
- HAWKINS, R.H. 1980. Infiltration and curve numbers: Some pragmatic and theoretic relationships. Symposium on Watershed Management. ASCE. Boios, Idahs. 925-937.
- HORTON, R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions American Geophysical Union*. 14, 446-460.
- KUICHING, E. 1889. The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *American Society of Civil Engineers*, 20, 1-56.
- LVOVICH, M.I. 1979. World water resources and their future. Translation of the original Russian edition (1974). American Geophysical Union, Washington.
- MONITORING OF SPRING DISCHARGE AND SURFACE WATER RUNOFF IN THE GROUNDWATER CONTRIBUTION ZONE OF JEITA SPRING. 2013. Raifoun.
- PONCE, V.M. 1989. New edition 2015. Engineering Hydrology: Principles and Practices. Pearson Education.
- SCS NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. 1993. Section 4: Hydrology, Chapter 4. Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C.
- SMITH, R.E. 1976. Approximations for vertical infiltration rate. *ASAE-19*, 505-509.
- THOMPSON, D.B. 2006. The Rational Method. Civil Engineering Department Texas Tech University Draft.
- TILCH, N. and others. 2003. Subsurface flow processes at the hillslope scale. Recent Results of Hillslope Investigations at the Brugga Basin. The Albert Ludwig University of Freiburg. Jahrgang.
- US DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1986. Natural resources conservation service, conservation engineering division. Technical Release 55 (TR-55) (Second edition).
- YAEGER M.A., etc. 2009. A functional model of watershed-scale annual water balance partitioning: Lvovich, Ponce and Shetty revisited. American Geophysical Union. Fall Meeting.

Рецензент: д.г.н. Ф.А.Иманов